

中国激光

Chinese Journal of Lasers

ISSN 0258-7025, CN 31-1339/TN

《中国激光》网络首发论文

题目: CLD 对角膜适配性的近轴光学成像分析
作者: 岳炜, 杨秀彬, 徐婷婷, 韩金良, 王绍恩
收稿日期: 2020-06-22
网络首发日期: 2020-09-15
引用格式: 岳炜, 杨秀彬, 徐婷婷, 韩金良, 王绍恩. CLD 对角膜适配性的近轴光学成像分析[J/OL]. 中国激光.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20200914.1415.010.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

CLD 对角膜适配性的近轴光学成像分析

岳伟^{1,2,3}, 杨秀彬^{1,3*}, 徐婷婷^{1,2,3}, 韩金良^{1,2,3}, 王绍恩^{1,2,3}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100039;

³中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 长春 130033;

摘要 角膜直接接触式光学显示设备(CLD)可满足增强现实技术(AR)领域成像视野广、分辨率高、轻薄美观等需求。其中, 关键成像部件角膜接触镜的设计会直接影响成像质量以及增加角膜危害几率等。为合理选择不同材质角膜接触镜, 本文首先基于几何光学成像的原理, 建立了佩戴角膜接触镜的角膜成像模型, 分析了佩戴不同折射率的角膜接触镜的角膜成像变化; 然后利用逆光学成像思维, 设计了一种用于检测成像质量变化的近轴光学系统, 分别将不同材料和厚度角膜接触镜加入该光学系统, 定量分析不同材质的角膜接触镜对成像质量的影响。该光学系统的有效焦距为 18.36mm, 筒长为 36.49mm, 像高为 2.48mm, 调制传递函数值接近极限衍射, 全视场的畸变量小于 0.1%。ZEMAX 仿真结果表明: 材料为硬性角膜接触镜 PMMA, 厚度为 0.05mm 的角膜接触镜可同时满足 AR 接触式设备的成像和佩戴需求。

关键词 光学设计; 几何光学成像; 角膜曲率; 光学材料; 畸变

中图分类号 0439; R778.3

文献标志码 A

Paraxial optical imaging analysis of CLD corneal adaptability

Yue Wei^{1,2,3}, Yang Xiu-bin^{1,3*}, Xu Ting-ting^{1,2,3}, Han Jin-liang^{1,2,3}, Wang Shao-en^{1,2,3}

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

³*Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

Abstract The Contact Lens Display can perform Augmented Reality imaging with a wide field of view, high-resolution, lightweight and beautiful appearance. However, as a key imaging component of the Contact Lens Display, the design of the contact lenses will directly affect the imaging quality, increase the chance of corneal infection, and cause other problems. In order to reasonably select the materials of contact lenses, based on the principle of geometric optical imaging, a corneal imaging model wearing contact lenses is established, and the imaging changes are analyzed; And then, according to the idea of reverse design, a paraxial optical system for detecting imaging quality is designed, and the cornea contact lenses of different materials and thicknesses are added respectively. Finally, the impact of corneal contact lenses of different materials on the imaging quality can be quantitatively analyzed. The effective focal length of the optical system is 18.36mm, the total length is 36.49mm, and the image height is 2.48mm. The Modulation transfer function value close to limit diffraction, and the distortion of the full field-of-view is less than 0.1%. ZEMAX simulation results show that the material of the contact lens is PMMA and the thickness is 0.05mm, which can meet

基金项目: 国家自然科学基金(No.61705222), 科技部国家重点研发技术(SQ2016YFB0501202)

* E-mail: E-mail: yangxiubin@ciomp.ac.cn;

the imaging and wearing requirements of AR contact devices.

Key words optical design; geometric optical imaging ; corneal curvature; optical materials ; distortion

OCIS codes 220.4610 ;220.2740;160.4670

1 引言

AR(Augmented Reality)技术可结合真实世界进行增强显示并具有有效输出的特性,使其在医疗研究与精密仪器制造、军用飞机导航技术、安防实景指挥、工程设计和远程机器人控制等领域具有广泛的应用。作为 AR 技术实现的关键成像部件,AR 眼镜的设计也是国内外研究人员的研究热点之一。但受限于 AR 设备狭窄的视场角(FOV)、光学显示设备系统质量大等因素,大多数 AR 眼镜不符合现有光学系统轻薄发展趋势,且价格昂贵、功能单一,分散注意等不足也限制了 AR 技术在现实生活中的应用。

为有效扩大 AR 设备的成像区域,提高其成像分辨率同时减小 AR 设备的质量,上海交通大学的陈杰等^[1]提出了一种角膜直接接触设备(Contact Lens Display ,CLD)的设计方法,该设计包括一组准直发光二极管和一副角膜接触镜,成功解决了视场角过小、眼球追踪、图像处理延迟沉重的传统 AR 眼镜的一系列问题;浙江工业大学的隋成华等^[2-4]对角膜的反射成像进行了建模,提出了一种用角膜地形图仪分析角膜形态的方法,但未能直接应用于带角膜接触镜的人眼进行分析。南京理工大学的王丹琦等^[5]建立了以 PMMA,PLA 为材料的人眼数据晶体模型,但 3D 打印产生的晶体与实际相比粗糙度较高,需要进一步提高加工工艺。南开大学的李蕊等^[6]人提出一种在个体眼光学结构基础上根据波前数据设计波前眼镜的新方法,可用于对佩戴波前眼镜后人眼的视觉质量的预先评估,需进一步借助其他面型来进行消除像差的影响,并不能对佩戴角膜接触镜的人眼进行检测;上述学者虽然提出了基于个体人眼光学结构的检测方法,分析了人眼角膜的形态,但并未针对带角膜接触镜的人眼进行成像分析。目前,国内在应用于 AR 设备的角膜接触镜对人眼成像产生像差影响仍处于空白状态。

本文基于几何光学球面镜成像原理^[7],通过光线追迹方法,建立了佩戴角膜接触镜的角膜成像计算模型;利用反向设计思路,设计了一种近轴光学成像系统,加入了不同材质的硬性角膜接触镜,运用光学设计软件对人眼视光系统进行了成像的仿真,对于 AR 设备中角膜接触镜单元的选配提供了评估方案和应用价值。

2 成像模型的建立

2.1 人眼成像机理

角膜接触式 AR 光学显示器没有大面积生产及应用最主要的原因之一是其在眼部上方进行基构造成像,需要对佩戴角膜接触镜的角膜成像进行分析^[8]。受人眼屈光度的影响,视网膜上所呈现的图像并不是一个不变量。只有在理想状态下(角膜形态正常、视力良好),借助人眼聚焦成像,进行虚拟与现实交互,呈现出虚拟世界的真实感。包含角膜接触镜的眼部光学结构组成如图 1 所示。

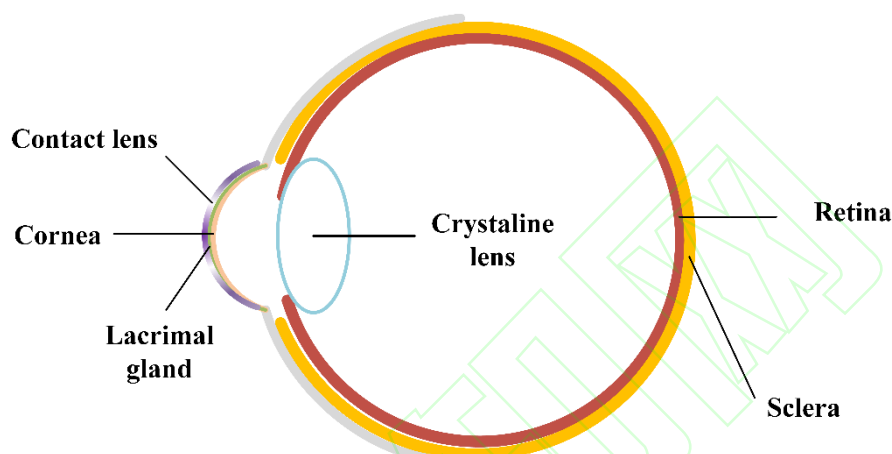


图 1 眼部光学结构图

Fig. 1 Eye optical structure

角膜是眼睛最前面的透明部分,角膜约占眼睛总屈光度的三分之二。人类角膜直径约 11.5mm,中心厚度约有 0.5~0.6mm,角膜完全透明,约占纤维膜的前 1/6,成年男性角膜横径平均值为 11.04mm,女性为 10.05mm,竖径平均值男性为 10.13mm,女性为 10.08mm。覆盖瞳孔及其前房,为眼睛提供屈光力,加上晶状体的屈光力,光线便可准确地聚集在视网膜上像。然而在实际对外界成像过程中,眼睛为光学成像接收单元,若“眼球”相当于可自动调焦的彩色照相机,则屈光系统(角膜和角膜接触镜)相当于“镜头”,由晶状体来调节“照相距离”,视网膜则为“彩色底片”,接触镜、泪液和眼球本身的屈光系统组成一个完整的光学屈光系统^[9]。视网膜上有约 600 万个视锥细胞,主要用于感光与视觉灵敏度相关^[10]。采用阵列 LED 的每个像素都能向晶状体的中心发射一束准直光束,类似于的虚拟视网膜显示或视网膜扫描显示,角膜接触镜不同于普通镜片角膜接触镜紧紧地附着在眼睛上,与眼球间几乎没有空气间隔,眼睛可以自由旋转而不丢失图像。

2.2 角膜接触镜成像分析

基于几何光学成像原理,我们建立了一种佩戴不同材料的角膜接触镜(不同材料的影响因素有很多,这里控制折射率为变量)的角膜成像计算模型^[11]。角膜形态从后面看为正圆形,

从前面看为横椭圆形。选用椭圆形当作参考物进行角膜及角膜接触镜横截面建模。如图 2(a) 所示，弧 ABC 为用于建模分析的椭圆形物体的一部分，B 为椭圆上一点。该成像模型包括两个成像过程：首先，物面上一点 B 点经角膜接触镜折射形成像点 B' ；然后像点 B' 再经角膜反射形成像点 B'' ，物点两次成像的完整光线追迹过程如图 2(b) 所示。下面我们根据成像原理具体分析成像过程：

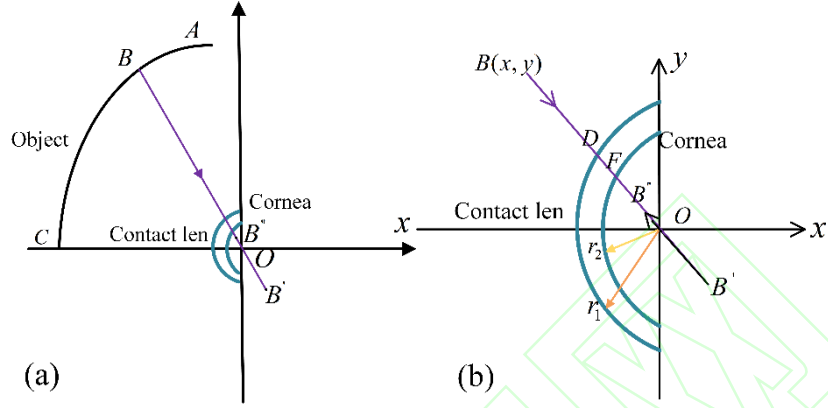


图 2 佩戴角膜接触镜的角膜成像计算模型

(a)物像位置示意图；(b)光线追迹进程

Fig. 2 imaging calculation model of corneal wearing contact lens

(a) Schematic diagram of object image position;(b) Ray tracing process

1) 首先计算角膜接触镜对物点的成像过程

将角膜接触镜近似为薄球面镜，根据几何光学球面镜成像原理，物点坐标为 $B(x, y)$ ，经折射后的像点坐标为 $B'(x_1, y_1)$ 的计算过程如下：

$$\frac{n_1}{l_1} - \frac{n_0}{l_0} = \frac{n_1 - n_0}{r_1}, \quad (1)$$

其中： r_1 为角膜接触镜(球面镜)半径， n_0 为空气折射率， n_1 为角膜接触镜的折射率。 l_0 为物距， l_1 为像距，可分别表示为：

$$l_0 = BD = r_1 - \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (2)$$

$$l_1 = B'D = \frac{n_1 \cdot l_0 \cdot r_1}{n_0 \cdot r_1 + (n_1 - n_0) \cdot l_0}, \quad (3)$$

又有物点 $B(x, y)$ 处于椭圆方程上，满足椭圆方程：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (4)$$

则折射后的像点坐标为 $B'(x_1, y_1)$ 可表示如下：

$$x_1 = (l_1 - r_1) \cdot \frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5)$$

$$y_1 = (l_1 - r_1) \cdot \frac{-y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (6)$$

2) 然后计算角膜镜反射过程，根据几何光学球面镜反射成像原理， $B'(x_1, y_1)$ 经角膜反射后的像点坐标 $B''(x_2, y_2)$ 的计算过程如下：

$$\frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3} = \frac{2}{r_2}, \quad (7)$$

其中 r_2 为角膜半径(近似为球面反射镜)， l_2 为物距， l_3 为像距，可分别表示为：

$$l_2 = B'F = B'D - FD = l_1 - (r_1 - r_2), \quad (8)$$

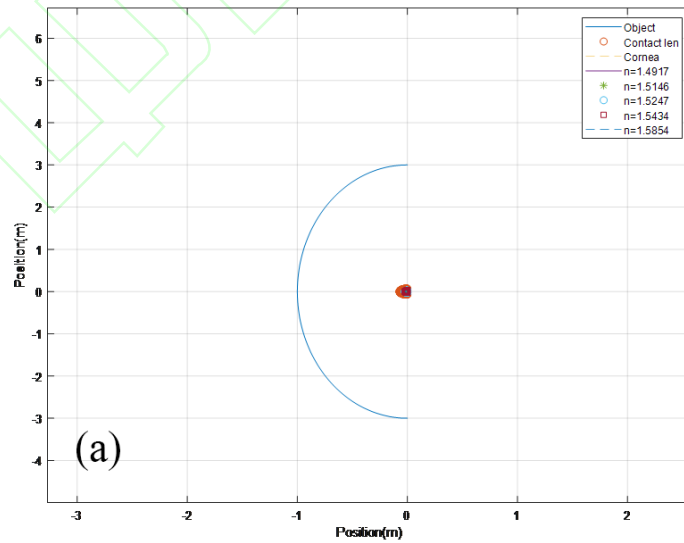
$$l_3 = B''F = \frac{l_2 \cdot r_2}{2 \cdot l_2 - r_2}, \quad (9)$$

则像点坐标 $B''(x_2, y_2)$ 可计算如下：

$$x_2 = (r_2 - l_3) \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (10)$$

$$y_2 = (r_2 - l_3) \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (11)$$

根据上述成像计算模型可知，椭圆物体上的每一个物点与像点存在一一对应关系，因此通过上式关系，利用仿真软件求解佩戴不同折射率角膜接触镜的角膜虚像点 B'' 的分布，如图 3 所示。可以看到，当角膜接触镜和角膜均为理想光学元件时，根据理想光学系统的物点和像点的物像共轭关系，椭圆形物体的像点也为完善像点。



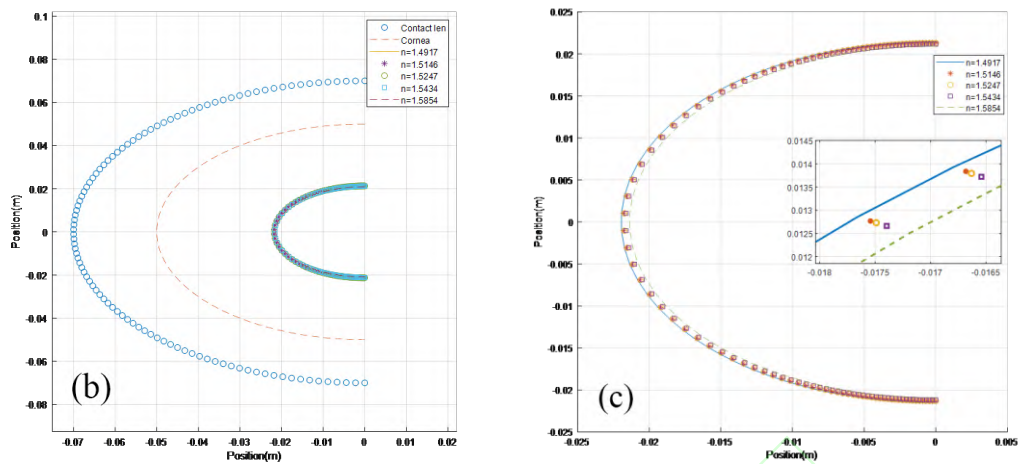


图 3 不同折射率角膜接触镜的虚像

(a)整体物像分布图;

(b)角膜接触镜、角膜及虚像局部放大图(c)在不同折射率下的虚像局部放大图

Fig. 3 Virtual images of contact lenses with different refractive indices

(a)Overall image distribution map;(b) Local enlarged view of contact lens, cornea and virtual image;

(c) Magnified view of virtual images with different refractive

如图 3(b)所示,角膜、角膜接触镜以及所呈现的像的位置有明显的不同。如图 3(c)所示,硬性角膜接触镜材料的折射率在 1.4917—1.5854 之间角膜的虚像位置,当折射率改变时,物体在人眼虚像的位置不同,对于人眼这类的精密成像单元来说,微小的变化也会影响成像效果,物体的完善像将受到不同程度的影响^[12]。为避免硬性角膜接触镜在 AR 成像中产生离焦影像(当眼调节静止时,平行光线经过眼屈光系统折射后,由于屈光系统各子午光线屈光力不同,引起不同的聚散度)破坏预期的成像质量。我们提出了一种利用光学仿真分析的方法,建立正常眼和添加角膜接触镜后两种近轴成像过程,分析光学系统的性能和图像的成像质量。

3 用于检测人眼的近轴成像光学系统的设计

根据上文像的位置的确定,与角膜接触式 AR 设备将远距离的物体移动到近物点,经由人眼屈光系统将成像,拟对视网膜上接收的像进行定性分析,设计了一种人眼充当探测器的近轴光学检测系统,根据实际成像需求设置技术指标,建立理想的光学模型^[13],本光学成像系统摒弃了传统的计算光学方面的繁杂理论,依据技术指标和要求在数据库中找出基础实例作为初始结构的部件(本文将不进行三级像差和 PWC 的公式进行计算)。正常人眼角膜所需测量前表面所需覆盖范围为 9.3mm,由于我们对佩戴角膜接触镜的角膜进行成像,所需测量前表面为 10mm 以内,采用近轴成像的方式,最大半视场为 0°、3.5°、5° 从而可以得到

完整角膜接触镜的像。在小相对孔径，短焦距的情况下，选用对称式结构，双胶合光学透镜的构型，理想成像镜头的初始结构如表 1 所示。

表 1 理想光学成像参数表

Table1 imaging parameters of optical system

Parameters	Value/mm
Total length	105/mm
Focal length	20/mm
Entrance pupil	8/mm
Cut-off frequency	67lp/mm
Image height	3mm

通过光学设计的模型理论，把像差和结构之间的函数关系，近似为线性方程式替代

$$F = F_0 + \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}), \quad (12)$$

其中原始系统的参数结构为 $(x_0, \dots, x_{0n})$ ，则像差对应各自变量的一阶导数 $(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n})$ ，

偏导数 ∂ 用差商 δ 来近似代替，则有像差和自变量之间的近似线性方程组：

$$F_m = F_{0m} + \frac{\delta f_m}{\delta x_1} \Delta x_m + \dots + \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \Delta x_n, \quad (13)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix}, \quad \Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - F_{01} \\ \vdots \\ F_n - F_{0n} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} \dots \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} \dots \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

由式 $A\Delta x = \Delta F$ 筛选出最小像差情形下的参数如表 2 所示

表 2 光学系统初始结构参数表

Table 2 Initial structural of optical system

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Class
Primary mirror	18.885	2.042	LAKN12
Secondary mirror	10.394	2.563	LAKN12
Tertiary mirror	12.574	0.728	BASF5
Quartus mirror	6.302	1.421	SSK4A
Eventual mirror	-10.299	0.525	KZFS1

在理想光学成像并不考虑高级像差只考虑单色像差的情况下,采用准直发光二极管对人眼阵列排布式照明，其波段为 486nm、587nm、656nm，为保证成像质量良好，利用 Zemax

软件进行成像系统的优化设计，设置玻璃对及其曲率组合，增加合理的透镜厚度，选择优化函数进行像差的校正。

Zemax 成像系统的最终光学二维示意图如图 4 示。选用了双高斯照相物镜，孔径光阑在透镜组的对称中心(镜组 1、2、3 及其 4、5、6 构成对称形式)，易校正垂轴像差。最外侧半部透镜结构为厚弯月透镜演变而来，有效校正场曲；中间两个复消色差双胶合的透镜结构，把两种色差聚集一点，减小二级光谱，可以消除色差。利用薄透镜的弯曲特性校正球差，调整透镜间距离可以校正像散。

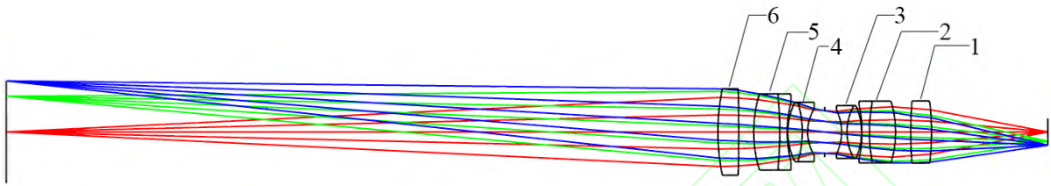


图 4 光学系统二维示意图

Fig. 4 2D-layout of optical system

MTF 值表征系统像的解析能力，曲线越接近极限衍射，成像质量越好，图像对比度越高。角膜对镜头的识别，在物体半高度为 5mm 的情况下，为了使图像边缘到达较高的锐利度，对高频和中频有所要求：中频位置表征图像层次传递的好坏，而图 5 中 MTF 值在中频 33.79lp/mm 处高于 0.8，67.58lp/mm 在高频处大于 0.6，接近衍射极限，满足了设计需求。各个透镜的单色像差和色差如图 6 示，比光线图更加直观的表现出整体像差分布。

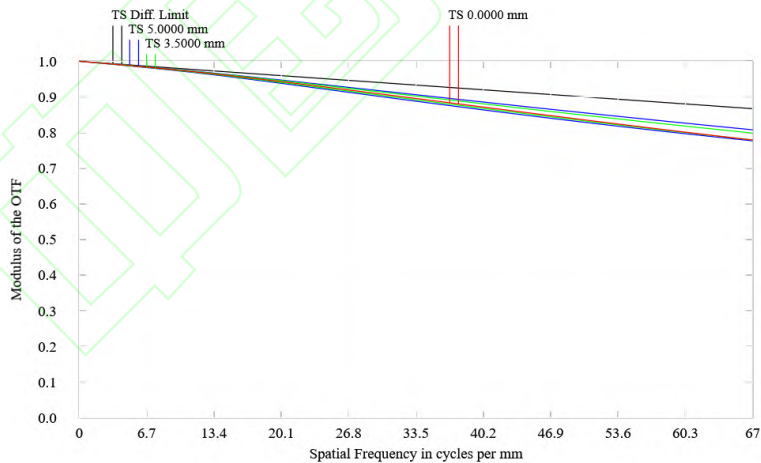


图 5 MTF 曲线图像

Fig.5 MTF curve image

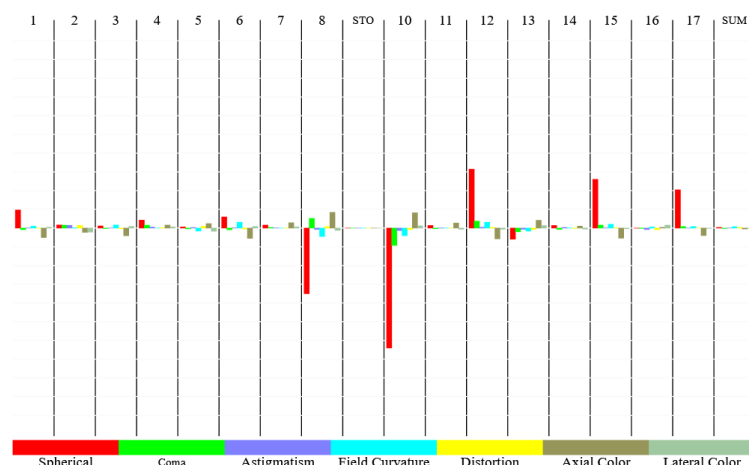


图 6 光学成像系统的赛德尔像差图

Fig.6 Seidel aberration diagram of optical imaging system

由上述光学系统的像差分布图和 MTF 曲线可知，该装置接近理想成像模型，系统总的像差和色差很小几乎可以忽略，当人眼处于像方接收位置时，视网膜上会呈现出清晰的像，适用于后续加入角膜接触镜后的检测。

4 光学性能分析

为了兼容作为封装层的 LED 阵列，保证镜片的成形性，选用硬性角膜接触镜，与软性镜片相比，更易获得更好的光学效果、更好的湿润性和抗沉淀性^[14]。在成像过程中，除了考虑到硬性角膜接触镜与角膜直接接触成像的不舒适感的问题，还应考虑每个人角膜都具有异同，受到自身曲率与屈光度和不同镜片材料、厚度、折射率等因素影响成像效果。目前主要以聚甲丙烯酸(polymethy methacrylate, pmma)等光学材料作为硬性角膜接触镜的材料，其光学特性如表 3 所示。

表 3 常见的光学材料光学特性一览表

Table 3 common optical material properties

Materials	Nd	Vd	Luminousness	Birefringence
PMMA	1.4917	57.2	92%	<20
PC	1.5854	29.9	88%	<65
APL5014CL	1.5445	56.0	90%	<20
ARTON-D4531F	1.5146	56.9	92%	<40
ZEONEX480	1.5247	55.8	92%	<25

总的来说，光学材料可从 Nd(折射率)、Vd(色散系数)、Luminousness(光学透过率)，Birefringence(应力双折射)等几个方面来筛选，一般来说，当人眼处于敏感状态时不能忽略阿贝数带来的视觉影响。当阿贝数过低时，透过镜片看物体会产生失真现象。双折射即材料的水平方向和竖直方向折射率的差值，双折射越大,越易造成图像畸变现象，降低了光学塑料的通光率，应尽量降低材料的双折射，材料的双折射可能导致在与入眼相容的过程中发生眩

光现象。根据表 3 数据分析可知，PC 作为角膜接触镜产生双折射十分明显，成像质量难以保证，从材料的物理性能上分析可知 APL5014CL、PMMA 具有高透光率、低应力双折射、可塑性强等优势，适用于作为角膜接触镜的材料初步选择。人眼的敏感性不能对所选的角膜接触镜的材料进行适配，利用反向设计的方法把对角膜接触镜作为光学透镜的形式加入对角膜理想的光学系统，将光线汇聚到角膜接收成像。对光电成像性能指标如分辨率、传递函数、畸变等，针对不同材料的 CLD 的筛选出最合适的角膜接触镜的材料和厚度的封层。如图 7 所示为加入角膜接触镜的光学系统二维图，0 为角膜接触镜，1、2、3 及 4、5、6 为对称式检验其光学性能的近轴成像装置，表 4 角膜接触镜的参数。

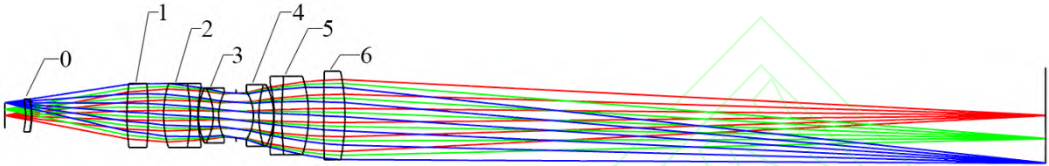


图 7 带角膜接触镜的光学系统二维图

Fig. 7 Two-dimensional diagram of an optical system with a contact lens

表 4 角膜接触镜参数

Table 4 corneal contact lens parameters

Surface		Thickness(mm)	Glass
Anterior cornea	-6.52	0.55	/
Posterior Contact lens	-7.76	0.04/0.05/0.06	PMMA/ APL5014CL
Anterior Contact lens	-8.13	9.16	PMMA/ APL5014CL

由表 3 常见的光学塑料一览表选用了折射率差异较大的 APL5014CL 和 PMMA 两种光学材料的角膜接触镜进行对比,通过设置的不同厚度的角膜接触镜利用光学性能对成像质量进行评价，从而筛选出最适用人眼的角膜接触镜。图 8(a)、(b)、(c)分别为厚度 0.04mm、0.05mm、0.06mm 材料为 PMMA,(e)、(f)、(g)分别为厚度 0.04mm/0.05mm/0.06mm 材料为 APL5014CL 光学传递函数 MTF 曲线的对比图。

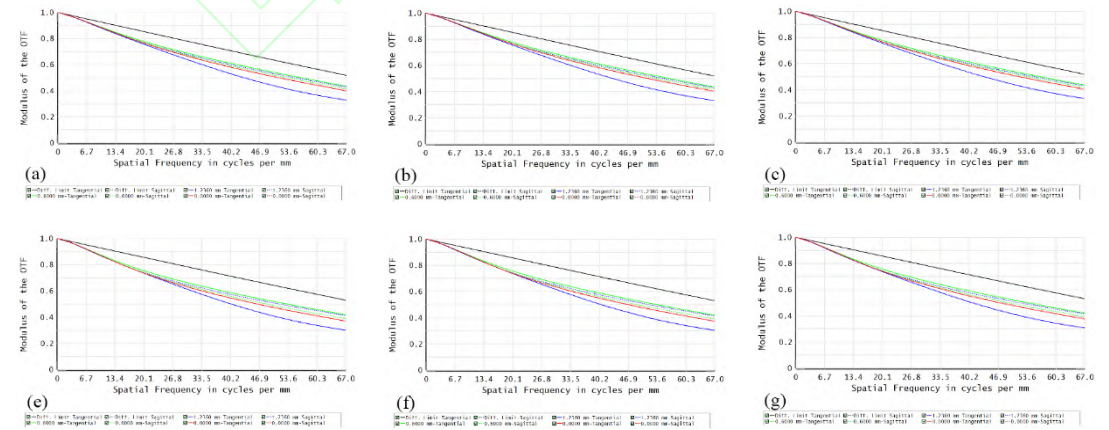


图 8 MTF 曲线的对比图

(a) 0.04mm/pmna; (b) 0.05mm/pmna; (c) 0.06mm/pmna;

(e) 0.04mm/ APL5014CL; (f) 0.05mm/ APL5014CL; (g) 0.06mm/ APL5014CL

Fig.8 Comparison of MTF curves

(a) 0.04mm/pmma;(b) 0.05mm/pmma;(c) 0.06mm/pmma;

(e) 0.04mm/ APL5014CL;(f) 0.05mm/ APL5014CL; (g) 0.06mm/ APL5014CL

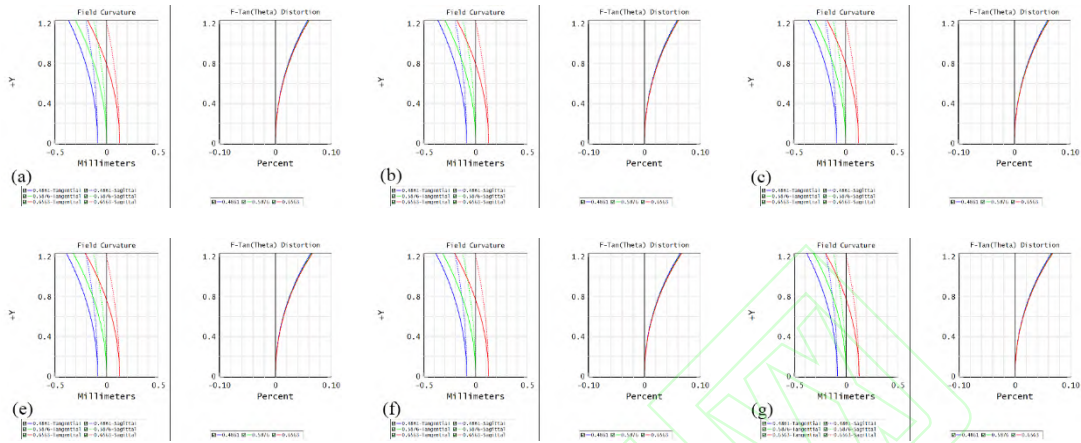


图 9 畸变和场曲对比图

(a) 0.04mm/pmma; (b) 0.05mm/pmma; (c) 0.06mm/pmma;

(e) 0.04mm/ APL5014CL; (f) 0.05mm/ APL5014CL; (g) 0.06mm/ APL5014CL

Fig. 9 Comparison of distortion and field curvature

(a) 0.04mm/pmma;(b) 0.05mm/pmma;(c) 0.06mm/pmma;

(e) 0.04mm/ APL5014CL;(f) 0.05mm/ APL5014CL; (g) 0.06mm/ APL5014CL

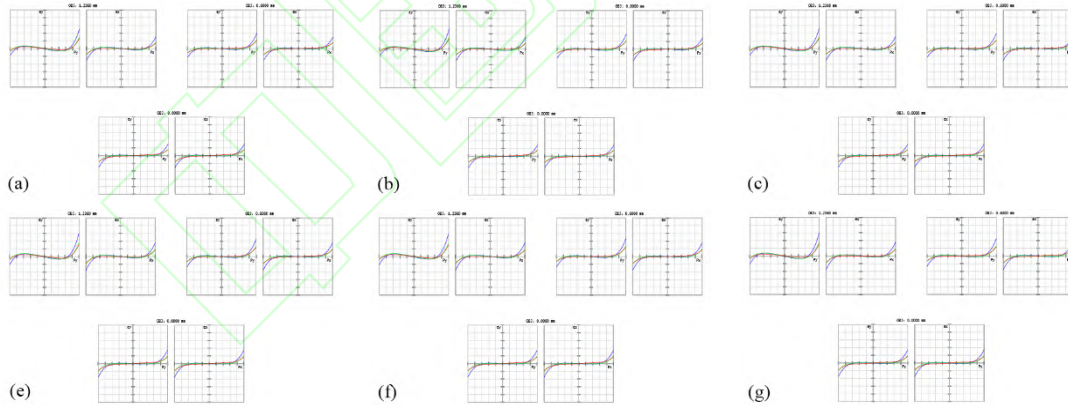


图 10 像差曲线对比图

(a) 0.04mm/pmma; (b) 0.05mm/pmma; (c) 0.06mm/pmma;

(e) 0.04mm/ APL5014CL; (f) 0.05mm/ APL5014CL; (g) 0.06mm/ APL5014CL

Figure 10 Comparison of aberration curves

(a) 0.04mm/pmma;(b) 0.05mm/pmma;(c) 0.06mm/pmma;

(e) 0.04mm/ APL5014CL;(f) 0.05mm/ APL5014CL; (g) 0.06mm/ APL5014CL

通过图 8、9、10 的对比可以看出当材料为 PMMA 时畸变和场曲、MTF 曲线、像差优于 APL5014CL。因此当材料为 PMMA，角膜接触镜厚度为 0.05mm 时，成像质量相对较高，

图像依次经过角膜接触镜、角膜、前房、最终投射到视网膜上。因此无论 APL5014CL 这种作为角膜接触镜材料的选取、光学性质硬性分析、仿真验证光学成像质量都不适用于作为 CLD 的选配材料。

5 结 论

本文基于几何光学成像原理,建立了佩戴角膜接触镜的角膜成像计算模型,设计了一种近轴光学系统,分析了不同材质的角膜接触镜对成像质量的影响。根据成像模型,通过 MATLAB 仿真表明物体经佩戴不同折射率的角膜接触镜的角膜成像后的像点分布不同于理想光学系统的完善像。根据角膜接触镜和角膜的特性,设计了一种用于检测角膜与角膜接触镜的适配性的可见光谱范围内的近轴光学系统,利用逆光学成像设计在光学系统中加入角膜接触镜作为检验装置,通过更换角膜接触镜的参数(材料、厚度),仿真分析最佳角膜接触镜选配方案。ZEMAX 仿真结果表明,当选用 APL5014CL 为材料时人眼角膜接收到的像有可能失真导致图像不清晰、3D 眩晕等现象,PMMA 更适用于硬性角膜接触镜的加工和角膜的贴合程度更佳。本文提出的近轴光学成像分析方法,可为 CLD 设备中的角膜接触镜的合理选择提供成像理论依据。

参考文献

- [1] Chen J, Mi L T, Chen C P, et al. Design of foveated contact lens display for augmented reality[J]. Optics Express, 2019, 27(26):38204-38219.
- [2] Chen C P, Zhou L, Ge J, et al. Design of retinal projection displays enabling vision correction[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28223-28235.
- [3] Tan G, Lee Y H, Zhan T, et al. Foveated imaging for near-eye displays[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25076-25085.
- [4] Sui C H, Wo S J, Gao N, et al. Design and implementation of imaging system for corneal topography based on placido disk[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12):1222001.
隋成华,沃圣杰,高楠,等. 基于Placido盘的角膜地形图仪成像系统设计与实现[J]. 光学学报, 2016, 36(12):1222001.
- [5] Wang D Q, Yuan Q, Yin C J, et al. Design and 3D Printing of Intraocular Lens Model Based on Human Eye Data in China [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020-06-03[2020-07-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200601.1734.151.html>.
王丹琦,袁群,殷长俊,等. 基于我国人眼数据的人工晶体模型及其3D打印技术研究[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2020-06-03[2020-07-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200601.1734.151.html>.
- [6] Li R, Wang Z Q, Liu Y J, et al. Design of corneal lens by wavefront technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(s1): 116001.
李蕊,王肇圻,刘永基,等. 波前角膜接触镜的设计[J]. 中国激光, 2011, 38(s1):116001.

- [7] Li Q, Xiang Y, Gu J D, et al. Optical design of "cell factory" microscopic monitoring device[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10):1016002.
李琦,向阳,谷俊达,等. “细胞工厂”显微监测装置的光学设计[J]. 中国激光, 2014, 41(10):1016002.
- [8] Gu J D, Liu Y J, Bian Y Y, et al. A Dual-Area aspheric diffractive intraocular lens for large corneal asphericity variation [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10):1022001.
谷健达,刘永基,边亚燕,等. 适用于大范围角膜非球面系数的双区域非球面衍射型人工晶体[J]. 光学学报, 2020, 40(10):1022001.
- [9] Zhou L P, Gan J H, Xu L, et al. Corneal contour measurement based on non-diffracting grating structure light projection. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(03):308001.
周莉萍,干江红,徐龙. 基于无衍射栅型结构光投影的角膜轮廓测量[J]. 中国激光, 2013, 40(03):308001.
- [10] Ji Y, Gao Q, Yu Y S, et al. OLED-on-Silicon Microdisplay Controller Based on Multi-Scale Pyramid[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12):1223001.
季渊,高钦,余云森,等. 基于多尺度金字塔的硅基OLED微显示控制器[J]. 光学学报, 2019, 39(12):1223001.
- [11] Ding Y T, Gao Z Y, Peng X, et al. Banding suppression and relay optical path design in head-mounted augmented reality system based on laser beam scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13):130801.
丁意桐,高震宇,彭旭,等. 激光扫描头戴增强现实系统中带斑的抑制与中继光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13):130801.
- [12] Dou Y, Kang J H, Wang L P. Novel non-classical receptive field model combined with human eye fletting[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(03):0310002.
窦燕,康锦华,王丽盼. 结合人眼微动的新型非经典感受野模型[J]. 光学学报, 2019, 39(03):0310002.
- [13] Zheng S L, Liu Y J, Wang Z Q, et al. Design of optical system for a novel imaging keratometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(05):0522004.
郑少林,刘永基,王肇圻,等. 新型成像角膜曲率仪的光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(05):0522004.
- [14] Bian Y Y, Liu Y J, Liu B K et al. Contact lens for controlling myopia progression and correcting myopia and astigmatism[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(04):0422001.
边亚燕,刘永基,刘宝凯,等. 控制近视进展并矫正近视散光的隐形眼镜[J]. 光学学报, 2020, 40(04):0422001.

网络首发:

标题: CLD对角膜适配性的近轴光学成像分析

作者: 岳炜, 杨秀彬, 徐婷婷, 韩金良, 王绍恩

收稿日期: 2020-06-22

录用日期: 2020-07-27

DOI: 10.3788/cjl202047.1207005

引用格式:

岳炜, 杨秀彬, 徐婷婷, 韩金良, 王绍恩. CLD对角膜适配性的近轴光学成像分析[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1207005.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法

甘雨 张方 朱思羽 龚爽 黄惠杰 杨宝喜

中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800

中国激光, 2019, 46(3): 0304007

宽光谱广角蛾眼抗反射超表面结构设计分析

林鹤 付跃刚 欧阳名钊 赵宇 朱启凡 吴锦双

长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

中国激光, 2019, 46(1): 0113002

星载激光雷达系统杂散光分析与抑制

穆永吉 李蕊 万渊 刘继桥 侯霞 陈卫标

中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

中国激光, 2018, 45(5): 0510005

定位生长量子点的金字塔形衬底的制备

李占国 王勇 尤明慧 高欣 李再金 李特 刘国军 曲轶

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

中国激光, 2017, 44(4): 0413001

30 kHz 窄瞬时线宽扫频激光光源的研制

陈明惠 李昊 范云平

上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093

中国激光, 2016, 43(4): 0416001